

(OPEN ACCESS)

## Laboratory study of the effect of Bendway weirs on pollution transfer in meandering rivers with sedimentary bed

Samaneh Nojoumi Siahmard<sup>1</sup>, Mehdi Meftah Halaghi<sup>\*2</sup>,  
Mahdi Esmaili Varaki<sup>3</sup>, Amirahmad Dehghani<sup>4</sup>, Abdolraza Zahiri<sup>5</sup>

1. Ph.D. Graduate of Hydraulic Structures, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [samaneh\\_nojoumi@yahoo.com](mailto:samaneh_nojoumi@yahoo.com)
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [meftah@gau.ac.ir](mailto:meftah@gau.ac.ir)
3. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [esmaeli@guilan.ac.ir](mailto:esmaeli@guilan.ac.ir)
4. Professor, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [a.dehghani@gau.ac.ir](mailto:a.dehghani@gau.ac.ir)
5. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: [zahiri@gau.ac.ir](mailto:zahiri@gau.ac.ir)

---

---

### Article Info

#### Article type:

Research Full Paper

#### Article history:

Received: 11.17.2024

Revised: 02.16.2026

Accepted: 02.25.2026

#### Keywords:

Longitudinal Dispersion,  
Meandering,  
Pollutant Concentration,  
Pollutant mixing,  
Sedimentary Bed,  
Tracer Test

---

---

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** In recent years, the rise in pollutant entry into surface waters and rivers has made studying the mixing process of pollutants increasingly important. Mixing in streams is influenced turbulence, nonuniform velocity, and molecular motion. Secondary current plays a significant role in determining mixing coefficients; enhancing these flows can improve the overall mixing process. One critical mixing coefficient is the longitudinal dispersion coefficient, which can be estimated through both theoretical and experimental methods. Increasing turbulence in rivers is one way to enhance their self-purification capacity. Installing structures like river wall protection systems, including various types of weirs, Bendway weirs, and submerged plates, can enhance turbulence and secondary flow patterns. This, in turn, helps improve the mixing of pollutants in the water. This present study aim is to investigate the effect of the bendway weirs on the mixing process and the longitudinal dispersion coefficient in the laboratory meandering channel. To achieve this, tracking experiments were conducted in a laboratory meander channel with a sedimentary bed, comparing conditions both with and without bendway weirs.

**Materials and Methods:** The experiments in this study were conducted in the Hydraulics and Physical Models Laboratory within the Water Engineering Department at the University of Guilan. The experiments took place in a rectangular flume with a length of 16 meters and a width of 1.5 meters. A salt and water solution was used as a tracer in each experiment, the flow concentration was measured with two Ec meters at two points: at the beginning and at the end of the tested intervals. Additionally, the changes in the salinity concentration curve were assessed at two points: at the start of the meandering path and at the end of each curve. By using the temporal concentration profiles, How the tracer is distributed, transferred, and changed in different intervals and flow rates is examined and then the longitudinal dispersion coefficient was estimated with the routing method, and the effect between hydraulic parameters and bendway weirs were compared.

---

**Results:** The results indicate that any increase in discharge per unit width from the minimum value ( $0.014 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ) to the maximum value ( $0.022 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ),  $Cr$ ,  $T_{pr}$ , and  $T_{dr}$  decreased up to 97% and  $U$  and  $D_L$  increased by 98% in most experiments. The experiments indicated that most of the considered parameters increase with distance and number of bends and an increase in the lengths of sections leads to the improvement of the indicators related to the reduction of salinity concentration as a symbol of pollution. A comparison of the results showed that by installing the bendway weirs on both sides of the channel with a ratio of 2.5 times the distance to the length of the spillways, the  $Cr$  and  $D_L$  parameters increased by 94% and decreased by 95%, respectively.  $Cr$  and  $D_L$  were achieved by installing the weirs in the inner arch with a ratio of 2.5 times the distance to the length of the spillways with an increase of 94% and a decrease of 97%, respectively. Additionally, the structure was installed on both sides of the channel at a ratio of 5 times the distance to the length of the weirs, mentioned parameters were decreased. Furthermore, the distance of the bendway weirs was reduced to 1.7 times the distance to the length of the weirs, resulting in another increase of 94%. Comparison of the time measurement parameters of the distribution and transfer of the tracer, including  $T_{pr}$  and  $T_{dr}$ , obtained from experiments without structures and with the installation of bendway weirs with different arrangements showed that the aforementioned parameters increased with the installation of structures. So the  $T_{pr}$  parameter increased by 66% after the installation of bendway weirs on both sides of the meandering path with a ratio of 2.5 times the distance to the weir length, increased by 61% with the installation of bendway weirs only on the inner curve with a ratio of 2.5 times the distance to the weir length, increased by 49% with the installation of bendway weirs on both sides of the path with a ratio of 5 times the distance to the weir length, and increased by 48% with the installation of weirs on both sides of the meandering path with a ratio of 1.7 times the distance to the weir length compared to the case without weirs. The  $T_{dr}$  parameter has increased by as much as 84% in most cases after the installation of bendway weirs in various configurations. The analysis of the results shows that installing these bendway weirs, along with the increase in obstacles, has resulted in a decrease in tracer transfer speed (denoted as parameter  $U$ ).

**Conclusion:** The analysis of the results showed that with the increase in the average velocity and turbulence of the flow in the experiments conducted on the sedimentary bed, the  $Cr$  was decreased and the  $D_L$  (Longitudinal dispersion coefficient) was increased. Also, the increase in the distance of sections and the number of arches of the meandering flume has led to an increase in  $Cr$  and  $D_L$  parameters. The results indicate that the installation of bendway weirs in various arrangements generally led to an increase in the  $Cr$  parameter and a decrease in the  $D_L$  parameter. Notably, placing weirs on both sides of the channel, at a distance that is 1.7 times the length of the weirs, demonstrated the best performance. This configuration resulted in simultaneous improvements in both the  $Cr$  and  $D_L$  parameters.

---

Cite this article: Nojoumi Siahmard, Samaneh, Meftah Halaghi, Mehdi, Esmaeili Varaki, Mahdi, Dehghani, Amirahmad, Zahiri, Abdolraza. 2026. Laboratory study of the effect of Bendway weirs on pollution transfer in meandering rivers with sedimentary bed. *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (1), 127-150.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2025.22996.3772

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سرریزهای قوس رودخانه بر انتقال آلاینده در رودخانه‌های پیچان‌رودی با بستر رسوبی

سمانه نجومی سیاهمرد<sup>۱</sup>، مهدی مفتاح هلقی<sup>۲\*</sup>، مهدی اسمعیلی ورکی<sup>۳</sup>،  
امیراحمد دهقانی<sup>۴</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۵</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [samaneh\\_nojumi@yahoo.com](mailto:samaneh_nojumi@yahoo.com)
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [meftah@gau.ac.ir](mailto:meftah@gau.ac.ir)
۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [esmaeili@guilan.ac.ir](mailto:esmaeili@guilan.ac.ir)
۴. استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [a.dehghani@gau.ac.ir](mailto:a.dehghani@gau.ac.ir)
۵. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: [zahiri@gau.ac.ir](mailto:zahiri@gau.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: امروزه با توجه به افزایش ورود آلاینده‌ها به آب‌های سطحی و رودخانه‌ها، مطالعه فرآیند اختلاط آلاینده‌ها در رودخانه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. اختلاط در آبراه‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی مانند آشفتگی، غیریکنواختی سرعت و حرکت مولکولی انجام می‌گیرد. جریان‌های ثانویه، یکی از عوامل مؤثر بر ضرایب اختلاط است که افزایش پارامتر مذکور می‌تواند منجر به بهبود در فرآیند اختلاط گردد. از ضرایب مهم اختلاط می‌توان به ضریب پراکندگی طولی اشاره کرد که از روش‌های نظری و تجربی قابل برآورد است. یکی از راه‌کارهای بهبود توان خودپالایی رودخانه‌ها، افزایش مقدار آشفتگی در رودخانه می‌باشد. کارگذاری سازه‌هایی مانند سازه‌های حفاظت دیواره رودخانه از جمله انواع آبشکن‌ها، سرریزهای مستغرق و صفحات مستغرق به دلیل الگوی جریانی که در اطراف و بین خود ایجاد می‌کنند می‌توانند موجب افزایش آشفتگی و جریان‌های ثانویه و در نتیجه کمک به بهبود اختلاط آلاینده‌ها شود. هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه بر فرآیند اختلاط و ضریب پراکندگی طولی، در مسیر پیچان‌رودی به روش آزمایشگاهی است. برای این منظور آزمایش‌های ردیابی در پیچان‌رود آزمایشگاهی با بستر رسوبی و در شرایط با و بدون سرریزهای قوس رودخانه انجام گرفت.
تاریخ دریافت: ۰۳/۰۸/۲۷ تاریخ ویرایش: ۰۴/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۰۴/۱۲/۰۶	
واژه‌های کلیدی: اختلاط آلاینده، آزمایش‌های ردیابی، بستر رسوبی، پراکندگی طولی، پیچان‌رود، غلظت آلاینده	
	مواد و روش‌ها: آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان، در فلومی مستطیلی به طول ۱۶ متر و عرض ۱/۵ انجام گرفت.

به منظور ایجاد مسیر پیچان رودی به کمک ورق‌های فلزی مسیر پیچان رودی متشکل از ۸ قوس با شعاع ۰/۵ متر ایجاد شد و سپس کف پیچان رود به کمک ماسه معدنی به قطر ۲/۵ میلی‌متر پوشانده شد. برای انجام آزمایش‌های ردیابی از محلول آب و نمک به عنوان ماده ردیاب استفاده شد. در هر آزمایش غلظت جریان در دو نقطه ابتدا و انتهای بازه‌های مورد آزمایش به کمک دو دستگاه EC متر اندازه‌گیری و سپس تغییرات منحنی غلظت شوری در دو نقطه ابتدای مسیر پیچان رودی و انتهای هر یک از قوس‌ها، اندازه‌گیری شد. در ادامه با به‌کارگیری نمودارهای تغییرات زمانی غلظت، چگونگی توزیع، انتقال و تغییرات ردیاب در بازه‌ها و دبی‌های مختلف بررسی و سپس ضریب پراکنندگی طولی به کمک روش روندیابی برآورد شده و مقایسه بین اثر پارامترهای هیدرولیکی و کارگذاری سرریز بر آن‌ها انجام شد.

**یافته‌ها:** نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش دبی واحد عرض از  $0.14 \text{ m}^3/\text{m.s}$  به  $0.22$  پارامتر  $Cr$  (بیانگر اختلاف بیشینه غلظت ورودی و خروجی به بازه مورد آزمایش) در غالب آزمایش‌ها با کاهش مقدار تا ۹۷ درصد، پارامتر  $T_{pr}$  (بیانگر اختلاف زمان نسبی رسیدن به بیشینه غلظت در دو نقطه اندازه‌گیری) در اغلب آزمایش‌ها با کاهش مقدار تا ۹۰ درصد، پارامتر  $T_{dr}$  (بیانگر اختلاف زمان نسبی خروج ابر ردیاب از بازه مورد مطالعه) در غالب آزمایش‌ها با کاهش مقدار تا ۶۰ درصد، پارامتر  $U$  (نشان‌دهنده سرعت انتقال ردیاب) در تمامی آزمایش‌ها با افزایش مقدار تا ۸۵ درصد و پارامتر  $D_L$  (بیانگر ضریب پراکنندگی طولی) در غالب آزمایش‌ها با افزایش مقدار تا ۹۸ درصد مواجه شده‌اند. تجزیه و تحلیل نتایج بیانگر آن است که افزایش مسیر پیمایش غلظت تزریق شده، منجر به بهبود شاخص‌های مرتبط با کاهش غلظت شوری به عنوان نماد آلاینده می‌شود. به طوری که پارامترهای  $Cr$  و  $D_L$  به ترتیب با ۶۶ و ۹۶ درصد افزایش مقدار بیش‌ترین تغییرات را داشتند. مقایسه نتایج نشان داد که با کارگذاری سرریز قوس رودخانه در دو طرف مسیر با نسبت ۲/۵ برابری فاصله به طول سرریزها پارامترهای  $Cr$  و  $D_L$  به ترتیب ۹۴ درصد افزایش و ۹۵ درصد کاهش یافتند. پارامترهای مذکور با کارگذاری سرریز در قوس داخلی با نسبت ۲/۵ برابری فاصله به طول سرریزها به ترتیب با افزایش مقدار تا ۹۴ درصد و کاهش مقدار تا ۹۷ درصد، با کارگذاری سازه در دو طرف مسیر پیچان رودی با نسبت ۵ برابری فاصله به طول سرریزها با کاهش مقدار و با کاهش فاصله کارگذاری سرریزها به ۱/۷ برابری نسبت فاصله به طول سرریزها با افزایش مقدار تا ۹۴ درصد حاصل گردیدند. مقایسه پارامترهای سنجش زمانی توزیع و انتقال ردیاب شامل  $T_{pr}$  و  $T_{dr}$  حاصله از آزمایش‌های بدون سازه و با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف نشان داد که با نصب سازه‌ها پارامترهای مذکور با افزایش مقدار مواجه شدند. به طوری که پارامتر  $T_{pr}$  به دنبال کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در دو طرف مسیر پیچان رودی با نسبت ۲/۵ برابری فاصله به طول سرریزها با ۶۶ درصد افزایش مقدار، با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه تنها در قوس داخلی با نسبت ۲/۵ برابری فاصله به طول سرریزها تا ۶۱ درصد افزایش مقدار، با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در دو طرف مسیر با نسبت فاصله به طول سرریزها برابر با ۵، تا ۴۹ درصد و با کارگذاری سرریزها در دو طرف مسیر پیچان رودی با نسبت ۱/۷ برابری فاصله به طول سرریزها تا ۴۸ درصد افزایش مقدار نسبت به حالت بدون سرریز داشت. هم‌چنین پارامتر

---

$T_{dr}$  نیز در اغلب موارد پس از کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف با افزایش مقدار تا ۸۴ درصد مواجه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج بیانگر آن است که کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف و افزایش موانع منجر به کاهش سرعت انتقال ردیاب (پارامتر  $U$ ) شده است.

**نتیجه‌گیری:** تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که در آزمایش‌های انجام گرفته بر روی بستر رسوبی، با افزایش متوسط سرعت و تلاطم جریان، پارامتر  $Cr$  با کاهش مقدار و پارامتر  $D_L$  با افزایش مقدار مواجه شده است. همچنین افزایش مسافت نسبی و تعداد قوس‌های آبراهه منجر به افزایش پارامتر  $Cr$  و  $D_L$  گردیده است. نتایج بیانگر آن است که به‌طورکلی با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف در اغلب موارد پارامتر  $Cr$  با افزایش مقدار و پارامتر  $D_L$  با کاهش مقدار مواجه شده است. از این میان کارگذاری سرریزها در دو طرف مسیر با نسبت ۱/۷ برابری فاصله به طول سرریزها به‌دلیل افزایش هم‌زمان دو پارامتر  $Cr$  و  $D_L$  عملکرد بهتری داشت.

---

**استناد:** نجومی سیاهمرد، سمانه، مفتاح هلقی، مهدی، اسمعیلی ورکی، مهدی، دهقانی، امیراحمد، ظهیری، عبدالرضا (۱۴۰۵). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سرریزهای قوس رودخانه بر انتقال آلاینده در رودخانه‌های پیچان‌رودی با بستر رسوبی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۳ (۱)، ۱۵۰-۱۲۷.

DOI: 10.22069/jwsc.2025.22996.3772



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

### مقدمه

در دهه‌های اخیر با ورود آلاینده‌ها به آب‌های سطحی و تغییر کیفیت آب این منابع، زندگی موجودات زنده و محیط‌زیست دچار پیامدهای منفی و گاهی غیرقابل‌جبران شده است. کیفیت پایین آب رودخانه‌ها می‌تواند منجر به خطرات زیادی برای حیات آبیان، انسان‌ها و گیاهان، مصرف و تقاضای شرب، کشاورزی، صنعتی، گردشگری و تفریحی شود بنابراین کنترل و رفع این مشکل نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار زیادی است.

یکی از راه‌های کنترل آلودگی در منابع آبی، به‌ویژه رودخانه‌ها مطالعه و بررسی فرآیند اختلاط آلاینده‌ها است. هنگامی که آلاینده‌ای در جریان رودخانه رها شود به‌علت حرکت مولکولی، تلاطم و هم‌چنین غیریکنواختی سرعت، به‌سرعت در آب پخش و همراه با جریان آب، جابجا می‌شود. پدیده اختلاط آلاینده در رودخانه‌ها شامل فرآیندهای مختلف فیزیکی است که تحت عنوان انتقال<sup>۱</sup> (نقل و انتقال ماده توسط جریان سیال)، پراکندگی<sup>۲</sup> (انتشار آلاینده به علت اختلاف در سرعت جریان در نقاط مختلف) و انتشار<sup>۳</sup> (پخش مولکولی آلاینده در سیال به علت حرکت مولکولی) طبقه‌بندی می‌شوند (۱). آلاینده‌ها با ورود به رودخانه‌ها توسط پدیده همرفتی (انتقال) از منبع دور شده و به کمک پدیده‌های انتشار و پراکندگی (پخشیدگی)، در آبراه گسترش می‌یابند. فرآیند اصلی اختلاط، انتقال آلاینده‌ها در جهت جریان رودخانه است. انتقال جانبی در عرض رودخانه معمولاً نادیده گرفته می‌شود. اختلاط کامل بار آلاینده و جریان رودخانه در جهت عمودی و جانبی معمولاً در مسافت کمی پس از ورود آلاینده صورت می‌گیرد. پژوهش‌ها نشان داده که در آبراه‌های پیچان‌رودی و دارای

قوس، به‌دلیل وجود جریان ثانویه قوی و جریان‌های چرخشی، ضریب اختلاط عرضی ۷ تا ۲۰ برابر بیش‌تر از این ضریب در آبراه‌های مستقیم است (۲). بسته به پیکربندی جریان، جریان‌های ثانویه ممکن است نرخ اختلاط را در همه جهات یا به‌طور انتخابی در تنها یک جهت، افزایش یا کاهش دهند (۳). با توجه به الگوی جریانی که در اطراف سازه‌های حفاظت دیواره رودخانه مانند انواع آبشکن‌ها، سرریزهای مستغرق و صفحات مستغرق و نیز سازه‌های کنترل تراز بستر شکل می‌گیرد، از این سازه‌ها می‌توان برای افزایش ضریب اختلاط عرضی و به‌دنبال آن تسریع در فرآیند اختلاط و کاهش طول اختلاط در کانال‌ها و مجاری باز استفاده کرد. با ایجاد مصنوعی جریان‌های ثانویه، نه‌تنها آلاینده و ردیاب با سرعت بیش‌تری در آب مخلوط می‌شود، بلکه حرکت آن در جهت طولی نیز متوقف می‌شود، زیرا فرآیندهای اختلاط طولی و عرضی با یکدیگر نسبت معکوس دارند (۴).

ضرایب پراکندگی را می‌توان با استفاده از دو روش روابط تجربی و نظری، و برآورد ضریب با توجه به پارامترهای هیدرولیکی و انجام آزمایش‌های میدانی و اندازه‌گیری داده‌های غلظت حاصل از آزمایش ردیاب برآورد کرد (۵). نخستین بار فیشر روش روندیابی را که اغلب برای پیش‌بینی سیلاب در هیدرولوژی استفاده می‌شود، برای محاسبه ضریب پراکندگی طولی به مدل یک‌بعدی اختلاط تعمیم داد. او نیمرخ زمانی غلظت را در دو نقطه، در پایین‌دست محل تزریق ردیاب اندازه‌گیری نمود و سپس با استفاده از تقریب ابر ردیاب، منحنی تغییرات زمانی غلظت را در نقطه دوم محاسبه و با مقایسه منحنی تغییرات زمانی غلظت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، مقدار ضریب پراکندگی طولی ( $D_L$ ) را برآورد کرد (۶).

- 1- Advection
- 2- Dispersion
- 3- Diffusion

مطالعه خود از روش مبتنی بر سرعت و روش ردیاب استفاده نمودند. آزمایش‌های ردیاب نشان دادند که ابر ردیاب به دنبال خط پیشینه سرعت پراکنده می‌شود و حداکثر سرعت نیز، صرف‌نظر از شرایط جریان، در کوتاه‌ترین مسیر کانال اتفاق می‌افتد (۱۲).

شین و همکاران (۲۰۲۰)، در مطالعه خود با استفاده از داده‌های سرعت و غلظت به‌دست آمده از آزمایش ردیاب در مدل پیچان‌رودی بزرگ مقیاس، ضرایب طولی و عرضی را در معادله انتشار-انتقال محاسبه نمودند. با مقایسه ضرایب محاسبه شده با روش‌های مبتنی بر سرعت با ضریب به‌دست آمده از روش روندیابی، دریافتند که ضرایب طولی حاصل از روش روندیابی چندین مرتبه بزرگ‌تر از روش مبتنی بر سرعت است درحالی‌که ضرایب عرضی به‌دست آمده از هر دو روش، هم‌پوشانی خوبی با یکدیگر دارند (۱۳).

نجومی سیاهمرد و همکاران (۲۰۲۳)، ورود آلاینده به پیچان‌رودها را بوسیله آزمایش‌های ردیاب برای دو بستر صلب و رسوبی با دبی‌های متفاوت و بازه‌هایی با طول‌های متفاوت مورد اندازه‌گیری و ارزیابی قرار دادند. نتایج بیانگر آن است که برای هر دو جنس بستر صلب و رسوبی، با افزایش عدد رینولدز در هر بازه مقادیر ضریب پراکندگی طولی افزایش یافت. مقایسه نتایج بیانگر آن بود که با تغییر جنس بستر، پارامترهای اختلاف نسبی بیش‌ترین غلظت ورودی و خروجی بازه‌ها و ضریب پراکندگی طولی افزایش یافتند. آن‌ها بیان نمودند که بستر رسوبی عملکرد بهتری در بهبود پارامترهای اختلاف دارد، به‌خصوص اثر بخشی جنس بستر رسوبی در بازه‌هایی با طول کوتاه‌تر مشهودتر است (۱۴).

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد با ایجاد و یا افزایش مصنوعی جریان‌های ثانویه از روش‌های گوناگون از جمله کارگذاری سازه‌هایی در آبراه‌ها

سئو و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از آزمایش‌های ردیاب ضرایب پخش عرضی و طولی را از روش روندیابی برآورد نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که این ضرایب با افزایش نسبت سرعت جریان به سرعت برشی ( $u/u^*$ ) و نسبت عرض به عمق جریان ( $W/h$ ) افزایش می‌یابند. هم‌چنین آن‌ها دریافتند که برخلاف ضریب پخش عرضی، انحنای جریان بر ضریب پخش طولی تأثیر ندارد (۷).

آزدان و همکاران (۲۰۱۸)، انتقال آلاینده را در فلوم آزمایشگاهی با بستر رسوبی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های ردیاب نشان داد که در شیب طولی و دبی ثابت، با افزایش فاصله از محل تزریق، ضریب پراکندگی طولی افزایش می‌یابد. هم‌چنین آن‌ها بیان نمودند که در شیب ثابت، رابطه تغییرات دبی و ضریب پراکندگی طولی مستقیم است. هم‌چنین، برای دبی ثابت با افزایش شیب بستر، ضریب پراکندگی طولی کاهش می‌یابد (۸).

پارک و سئو (۲۰۱۸)، با استفاده از محاسبات گام‌به‌گام که شامل انتقال عرضی و اختلاط عمودی بود، ضرایب پراکندگی عرضی و طولی را برای کانال‌های پیچان‌رودی بررسی نمودند. مقایسه نتایج نشان داد که استفاده از روش مذکور نسبت به روش قوانین نفوذ (۱۰)، هم‌پوشانی بهتری با نمودار غلظت دارد (۹).

لانزونی و همکاران (۲۰۱۸)، براساس توپوگرافی بستر و اثر قوس رودخانه بر میدان جریان، معادله‌ای بر پایه فیزیک برای برآورد ضریب پراکندگی طولی ارائه دادند. با بررسی ضرایب به‌دست آمده از آزمایش‌های میدانی حاصل از آزمایش ردیاب دریافتند که معادله پیشنهادی متوسط ضریب پراکندگی طولی را برآورد می‌کند (۱۱).

پارک و آن (۲۰۱۹)، الگوی جریان و اختلاط را در پیچان‌رودها مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در

وست و همکاران (۲۰۲۰)، برای پیش‌بینی نیمرخ عرضی غلظت املاح در لایه برشی ایجاد شده توسط پوشش گیاهی موجود در مرزها، با توجه به توزیع عرضی سرعت طولی و انتشار عرضی، مدلی دوبعدی مبتنی بر تفاضل محدود ارائه نمودند (۱۶).

همان‌طور که پیش‌تر بیان گردید یکی از راه‌های بهبود در فرآیند اختلاط آلاینده‌ها در آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، افزایش جریان‌های ثانویه است. احداث سازه‌هایی مثل آب‌شکن‌ها، صفحات مستغرق و سرریزهای قوس رودخانه به دلیل الگوی جریانی که در اطراف خود ایجاد می‌کنند می‌توانند به افزایش جریان‌های ثانویه کمک کنند. سرریزهای قوس رودخانه دیواره‌های سنگی یا گابیونی با ارتفاع کوتاه هستند که برای بهبود پایداری دیواره‌ها در قوس رودخانه و دبی‌های با دوره بازگشت کم به کار برده می‌شوند. این سازه‌ها مولد جریان‌های چرخشی در آبراهه هستند. از آن‌جا که تاکنون پژوهشی درخصوص تأثیر سرریزهای قوس رودخانه بر پارامترهای اختلاط در رودخانه‌های پیچان‌رودی با بستر رسوبی انجام نگرفته است، هدف از پژوهش حاضر مطالعه و بررسی تأثیر فاصله و آرایش کاگذاری سازه‌های مذکور بر مؤلفه‌های اختلاط آلاینده به کمک آزمایش‌های ردیابی درفلوم آزمایشگاهی که شامل آبراهه‌ای پیچان‌رودی با بستر رسوبی بود، است.

### مواد و روش‌ها

**تحلیل ابعادی:** با توجه به تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر اختلاط آلاینده‌ها در آبراهه‌های طبیعی شامل پارامترهای سیال، هندسه آبراهه، هیدرولیک جریان و پارامترهای مربوط به آلاینده می‌باشد که به صورت رابطه ۱ نوشته می‌شود.

$$f(\rho, \mu, g, V, h, W, f, R, S, C, L, X) = \text{Mixing} \quad (1)$$

می‌توان فرآیند اختلاط را بهبود بخشید. در ادامه به چند نمونه از مطالعات انجام گرفته در زمینه تأثیر کارگذاری سازه‌ها و افزایش زبری‌ها در آبراهه‌ها بر پارامترهای اختلاط اشاره شده است.

شارما و احمد (۲۰۱۲)، تأثیر تعداد ردیف صفحات مستغرق را بر ضریب اختلاط عرضی در آبراهه‌های مستقیم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش پردازش تصویر برای تعیین غلظت ردیاب در پایین‌دست محل تزریق استفاده کردند و نتیجه گرفتند که افزایش تعداد ردیف صفحات مستغرق موجب افزایش ضریب اختلاط عرضی می‌شود (۲).

چن و همکاران (۲۰۱۶)، تأثیر پوشش یخ در رودخانه‌ها را بر ضریب پراکندگی طولی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در رودخانه‌های پوشیده از یخ که معمولاً نسبت ابعاد بزرگ‌تر از ۱۰ است، ضریب پراکندگی ناشی از سرعت برشی عرضی ۵۰ برابر بزرگ‌تر از ضریب پراکندگی حاصل از سرعت برشی طولی است. هم‌چنین آن‌ها با توجه به انتگرال سه گانه فیشر رابطه‌ای تحلیلی ارائه دادند و با مقایسه ضریب به‌دست آمده از رابطه جدید دریافتند که وجود پوشش یخی در رودخانه‌های عریض و کم‌عمق، منجر به افزایش حدود سه برابری مقدار پراکندگی طولی خواهد شد (۱۵).

شارما و احمد (۲۰۱۸)، تأثیر پره‌های مستغرق بر ضریب اختلاط عرضی در فلوم آزمایشگاهی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای بررسی جریان چرخشی حاصل از پره‌ها و تأثیر آن بر اختلاط از سه اندازه پره با چیدمان‌های ردیفی مختلف استفاده نمودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که برای نسبت ارتفاع پره به عمق جریان کوچکتر مساوی ۰/۵، انتقال یا فرارفت، عامل اصلی اختلاط است. آن‌ها بیان داشتند پره‌هایی با ارتفاع بلندتر، ضریب اختلاط عرضی بیش‌تری تولید می‌کند و هم‌چنین تعداد ردیف‌های پره‌ها با ضریب اختلاط عرضی متناسب است (۴).

$$T_{pr} = \frac{T_{max_o} - T_{max_u}}{T_{max_o}} \quad (5)$$

$$T_{dr} = \frac{T_{max_o} - T_{max_u}}{T_{max_o}} \quad (6)$$

در معادله‌های ذکر شده،  $C_{max-u}$  بیانگر بیش‌ترین غلظت اندازه‌گیری شده در نیمرخ غلظت ورودی به بازه اندازه‌گیری و  $C_{max_o}$  برابر با بیش‌ترین مقدار غلظت اندازه‌گیری شده در نیمرخ غلظت خروجی در بازه اندازه‌گیری مورد آزمایش می‌باشد، هم‌چنین  $Cr$  پارامتری بی‌بعد است که نشانگر اختلاف غلظت ورودی و خروجی از بازه اندازه‌گیری می‌باشد.  $T_{max-u}$  و  $T_{max-o}$  به ترتیب نشان‌دهنده زمان رسیدن نیمرخ زمانی غلظت به بیشینه غلظت در نقطه اندازه‌گیری پایین‌دست و نقطه اندازه‌گیری بالادست است.  $T_{max-o}$  نشان‌دهنده مدت زمان خروج ابر ردیاب از نقطه خروجی (پایین‌دست بازه) و  $T_{max-u}$  نشان‌دهنده مدت زمان خروج ابر ردیاب از نقطه اندازه‌گیری در بالادست بازه مورد آزمایش است.  $T_{pr}$  و  $T_{dr}$  به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف زمان نسبی خروج ابر ردیاب از دو نقطه اندازه‌گیری و اختلاف زمان نسبی رسیدن به بیشینه غلظت در دو نقطه اندازه‌گیری می‌باشد.

به‌منظور برآورد ضریب پراکنندگی طولی از روش روندیابی و با استفاده از رابطه پیشنهادی فیشر (۱۹۶۸)، استفاده شد (۶). برای برآورد نیمرخ زمانی غلظت در نقطه دوم رابطه ۷ ارائه شد.

$$c(x_2, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Uc(x_1, \tau)}{\sqrt{4\pi D(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}} \quad (7)$$

$$\exp\left\{-\frac{[U(\bar{t}_2 - \bar{t}_1 - t + \tau)]^2}{4D(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}\right\} dt$$

در رابطه ۷،  $c(x_2, t)$  غلظت محاسبه شده در مقطع پایین‌دست بر حسب ppm،  $(x_2)$ ، غلظت  $c(x_1, \tau)$  مشاهده شده در مقطع بالادست  $(x_1)$  بر حسب ppm،

در رابطه ۱،  $\rho$  چگالی جریان،  $\mu$  لزجت،  $g$  شتاب گرانش،  $V$  متوسط سرعت جریان،  $h$  عمق جریان،  $W$  عرض آبراهه،  $f$  ضریب زبری،  $R$  شعاع قوس،  $S$  ضریب پیچان‌رودی،  $C$  غلظت آلاینده،  $L$  مسافتی که جریان حامل ردیاب از محل آزادسازی ردیاب تا نقطه اندازه‌گیری غلظت طی می‌کند و  $X$  اثر سرریز قوس رودخانه است.

به کمک تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، از رابطه ۱، رابطه بی‌بعد ۲ حاصل می‌گردد.

$$f(S, f, C, X, \frac{\mu}{\rho V h}, \frac{hg}{V^2}, \frac{W}{h}, \frac{R}{h}, \frac{L}{h}) = \text{Mixing} \quad (2)$$

از آن‌جاکه در بی‌بعدسازی، ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای حاصله را می‌توان به کار برد، بنابراین رابطه ۲ به صورت معادله ۳ حاصل شد.

$$f_2(S, f, C, X, \frac{W}{h}, \frac{R}{h}, L_r, Re, Fr) = \text{Mixing} \quad (3)$$

رابطه ۳ به عنوان معادله پایه‌ای برای انجام آزمایش‌ها و نیز تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت. در این رابطه  $L_r$ ،  $Re$  و  $Fr$  به ترتیب نشان‌دهنده مسافت نسبی طی شده توسط جریان حامل ردیاب، عدد رینولدز و عدد فرود می‌باشند.

**روابط کاربردی:** برای بررسی چگونگی تغییرات غلظت، با توجه به نمودارهای تغییرات زمانی غلظت، برای برآورد پارامترهایی بی‌بعد مانند  $Cr$  بیانگر اختلاف بیشینه غلظت ثبت‌شده در منحنی‌های تغییرات زمانی غلظت ورودی و خروجی،  $T_{pr}$  بیانگر اختلاف زمان رسیدن غلظت‌ها در دو نمودار ورودی و خروجی به مقدار بیشینه و  $T_{dr}$  بیانگر اختلاف زمان خروج ابر ردیاب از نقاط اندازه‌گیری پایین‌دست و بالادست در هر آزمایش از روابط ۴ تا ۶ استفاده شده است.

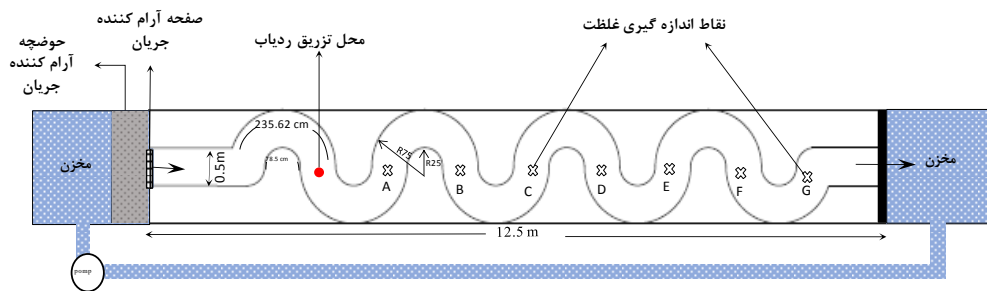
$$Cr = \frac{C_{max_u} - C_{max_o}}{C_{max_u}} \quad (4)$$

و مدل‌های فیزیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی به طول ۱۶، عرض ۱/۵ و عمق ۱ متر انجام شد. برای مدل‌سازی پیچان‌رود در داخل این فلوم، با استفاده از ورق‌های فلزی مسیر پیچان‌رودی به طول ۱۵/۵ متر و عرض ۵۰ سانتی‌متر با ۸ قوس ایجاد شد. به‌منظور شبیه‌سازی بستر رسوبی با استفاده از ماسه معدنی با قطر ۲/۵ میلی‌متر، ضخامت ۱۴ سانتی‌متر در مسیر پیچان‌رود ایجاد گردید. در شکل ۱ طرح کلی فلوم آزمایشگاهی و مسیر پیچان‌رودی با بستر رسوبی نشان داده شده است.

$U$  متوسط سرعت انتقال ردیاب بر حسب  $m/s$ ، که از رابطه ۸ به‌دست می‌آید،  $t$  زمان بر حسب  $s$ ،  $\bar{t}_1$  متوسط زمان عبور ابر ردیاب از مقطع بالادست،  $\bar{t}_2$  متوسط زمان عبور ابر ردیاب از مقطع پایین‌دست و  $D$  ضریب پراکندگی بر حسب  $m^2/s$  است.

$$U = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

در رابطه ۸،  $x_2 - x_1$  فاصله دو مقطع اندازه‌گیری از یکدیگر بر حسب  $m$ ، در بازه مورد مطالعه است. تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها: آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک



(الف)

(A)



(ب)

(B)

شکل ۱- الف) طرح کلی فلوم آزمایشگاهی و ب) مسیر پیچان‌رودی با بستر رسوبی.

Figure 1. A) Scheme of experimental flume and B) meandering channel with sedimentary bed.

انجام گرفت. اندازه‌گیری‌ها در نقاط ورودی و خروجی بازه‌ها انجام گرفته است. در جدول ۱ طول بازه‌های مورد آزمایش و فاصله هر بازه از محل تزریق ردیاب ارائه شده است.

سرریزهای قوس رودخانه با ابعاد ۸×۱۲ سانتی‌متر و از صفحات ضدآب تهیه شدند که توسط آهن‌ریا به فلوم متصل می‌گردید. کارگذاری سرریزها در چهار حالت مختلف فاصله نسبی (برابر با نسبت فاصله سرریزها به طول سازه) شامل: کارگذاری در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۲/۵، (فاصله سازه‌ها از یکدیگر برابر با ۳۰ سانتی‌متر، با نام مجموعه آزمایش WS1-1)، کارگذاری در قوس داخلی با فاصله نسبی ۲/۵ (مجموعه آزمایش WS1-0)، کارگذاری در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۵ (فاصله سازه‌ها برابر با ۶۰ سانتی‌متر از یکدیگر، با نام مجموعه آزمایش WS2-2) و کارگذاری در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۱/۷ (فاصله سرریزها از یکدیگر برابر با ۲۰ سانتی‌متر، با نام مجموعه آزمایش WS3-3) انجام گرفته است و به‌منظور بررسی کارایی کارگذاری سازه با آرایش‌های مختلف، نتایج حاصله با نتایج حاصل از مجموعه آزمایش‌های بدون کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه (مجموعه آزمایش WS0-0) مقایسه شده است. در شکل ۲ نمونه‌ای از کارگذاری سرریزها بر روی بستر روبی ارائه شده است.

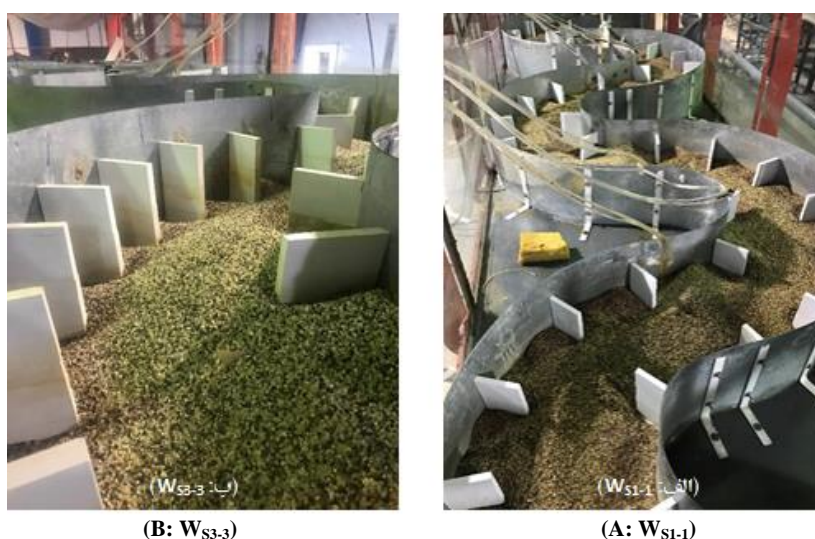
برای تأمین جریان، از یک پمپ سانتریفیوژ که به دستگاه تنظیم دور موتور مجهز است، استفاده شده است. جریان از مخزن پایین دست به مخزن بالادست منتقل می‌شود و پس از عبور از حوضچه آرامش، به فلوم وارد می‌گردد. به منظور کاهش تلاطم جریان، در ورودی فلوم و ابتدای مسیر پیچان ورودی از صفحه‌های آرام‌کننده بهره گرفته شده است. برای اندازه‌گیری دبی، از دبی‌سنج التراسونیک با دقت  $\pm 0.1$  لیتر بر ثانیه استفاده شده و عمق جریان با کمک دو عمق‌سنج که بر روی یک ارابه متحرک نصب شده و قابلیت جابجایی در سه جهت را دارند، اندازه‌گیری گردیده است.

به‌منظور انجام آزمایش‌های ردیاب، به‌دلیل سهولت اندازه‌گیری غلظت و همچنین دسترسی ساده و کم‌هزینه‌تر، از محلول آب و نمک (NaCl) به‌عنوان ماده ردیاب استفاده شد. سیستم تزریق شامل مخزن اولیه برای تهیه محلول، پمپ سانتریفیوژ، مخزن تأمین هد ثابت ثانویه، شیلنگ و اتصالات مربوطه برای تزریق بود. در هر آزمایش، مدت زمان آزادسازی ردیاب ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد. پس از تزریق ردیاب، شوری جریان در دو نقطه پایین دست محل تزریق با استفاده از دو دستگاه شوری‌سنج ساخت شرکت YSI اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری غلظت جریان به‌طور پیوسته از زمان ورود ابر ردیاب به نقطه اندازه‌گیری تا زمانی که ابر ردیاب از آن خارج شد،

جدول ۱- فاصله نقطه تزریق از اولین نقطه اندازه‌گیری شوری و طول بازه‌های مورد آزمایش.

Table 1. The length of measurement sections and the first point of EC measurement

نام بازه مورد آزمایش The test section	فاصله نقاط اندازه‌گیری غلظت از یکدیگر (m) The length of measurement section (m)	مسافت نسبی بازه‌ها $L_r$ (L/h)
Injection point-A	2.38	-
A-B	3.17	31.7
A-C	5.42	54.2
A-D	6.22	62.2
A-E	8.82	88.2
A-F	9.38	93.8
A-G	11.32	113.2



شکل ۲- کارگذاری سرریز قوس رودخانه در پیچان‌رود آزمایشگاهی با بستر رسوبی الف) مجموعه آزمایش W<sub>S1-1</sub>، ب) مجموعه آزمایش W<sub>S3-3</sub>.

Figure 2. Installation of the Bendway weirs in laboratory meandering with sedimentary bed a) test set W<sub>S1-1</sub>, B) test set W<sub>S3-3</sub>.

و تعداد قوس‌های متفاوت انجام گرفت. در این پژوهش، به‌منظور بررسی تأثیر کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف بر مؤلفه‌های اختلاط در مجموع ۹۰ آزمایش انجام شد. در جدول ۲ دامنه پارامترهای هیدرولیکی مورد آزمایش ارائه شده است.

پس از تثبیت بستر رسوبی و شکل‌گیری ناهمواری‌های بستر، در هر آزمایش، ابتدا دبی جریان تنظیم و سپس با تنظیم دریچه انتهایی، عمق موردنظر مشخص گردید. آزمایش‌ها برای دو حالت با و بدون حضور سرریزهای قوس رودخانه برای ۶ بازه با طول‌ها

جدول ۲- دامنه پارامترهای هیدرولیکی مورد آزمایش در پژوهش حاضر.

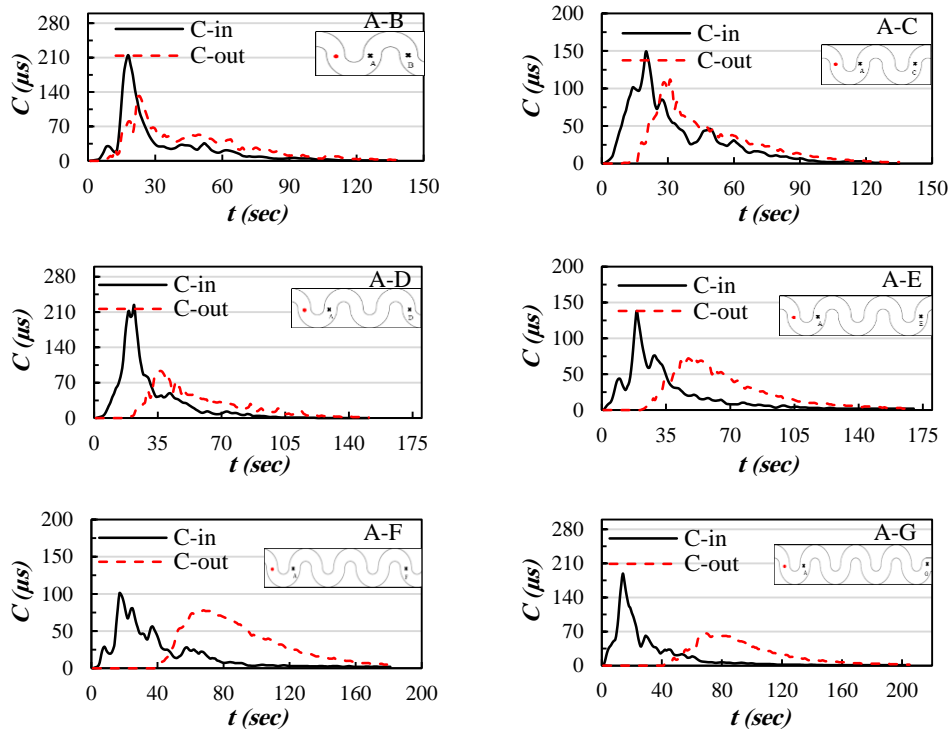
Table 2. Range of Hydraulic parameters of experiment in the current paper.

عدد رینولدز	عدد فرود	دبی واحد عرض	متوسط سرعت	ارتفاع جریان	R/h	W/h
Re	Fr	q (m <sup>3</sup> /m.s)	V (m/s)	h (m)		
76000	0.157	0.022	0.22			
46000	0.128	0.018	0.18	0.1	7.5	5
33000	0.099	0.014	0.14			

زمانی غلظت در مجموعه آزمایش‌های مختلف است. همان‌طور که در شکل‌های یادشده نیز مشاهده می‌گردد، با افزایش طول بازه و تعداد قوس‌ها در مسیر حرکت ابر ردیاب، اختلاف غلظت اندازه‌گیری شده در ورودی و خروجی بازه‌ها افزایش یافته و هم‌چنین با افزایش فاصله از نقطه آزادسازی ردیاب، نمودار تغییرات زمانی غلظت در نقطه خروجی یکنواخت‌تر شده است.

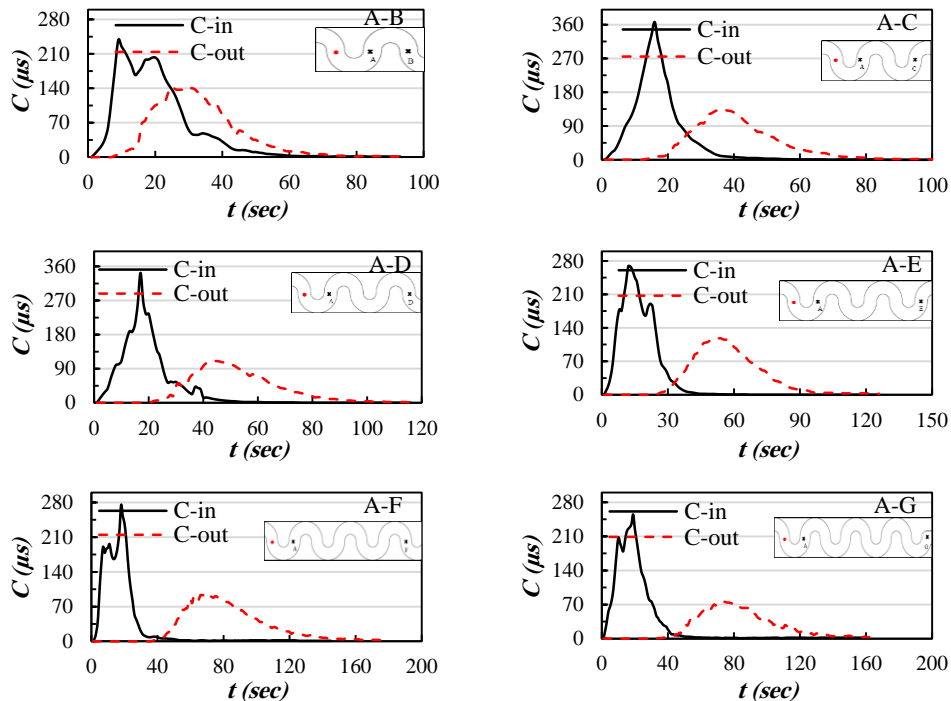
## نتایج و بحث

در پژوهش حاضر برای هر مجموعه آزمایش، ابتدا چگونگی توزیع، انتقال و تغییرات ردیاب در بازه‌ها و دبی‌های مختلف، به‌کمک نیمرخ‌های غلظت- زمان ثبت شده و پارامترهای بی‌بعد تعریف شده مانند  $Cr$ ،  $T_{dr}$  و  $T_{pr}$  مورد بررسی قرار گرفتند و سپس ضرایب پراکندگی برآورد شده در هر آزمایش مقایسه شدند. شکل‌های ۳ تا ۷ نشان‌دهنده نمودارهای تغییرات



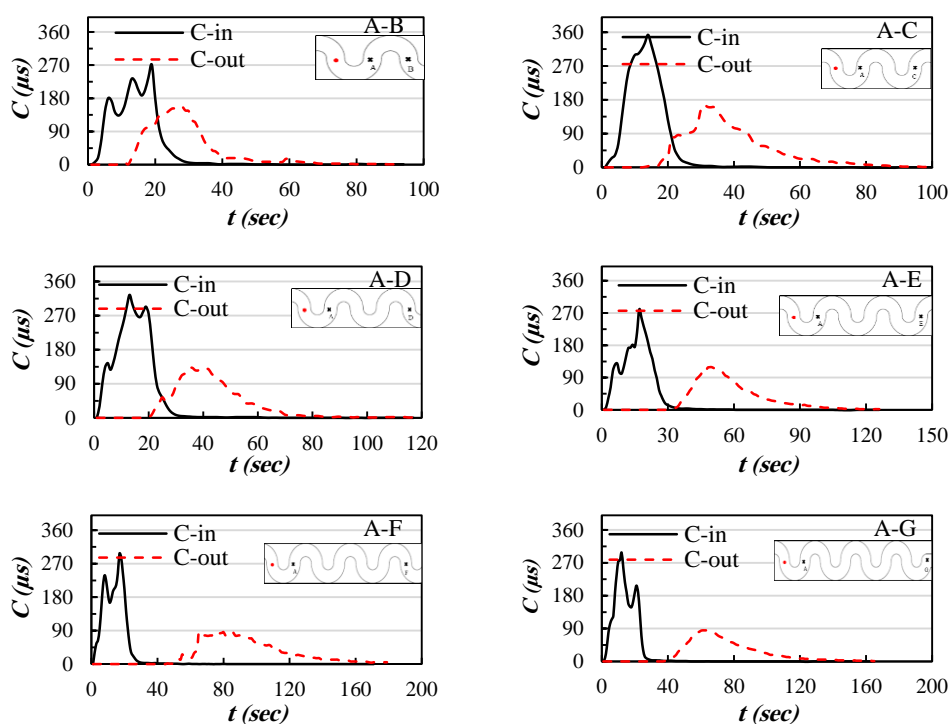
شکل ۳- نمودارهای تغییرات زمانی غلظت در بازه‌های مختلف برای دبی واحد عرض  $0.18 \text{ m}^3/\text{m.s}$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S0-0}$ .

Figure 3. Temporal concentration profiles of  $E_c$  for different location for  $q=0.018 \text{ m}^3/\text{m.s}$  and the test set  $W_{S0-0}$ .

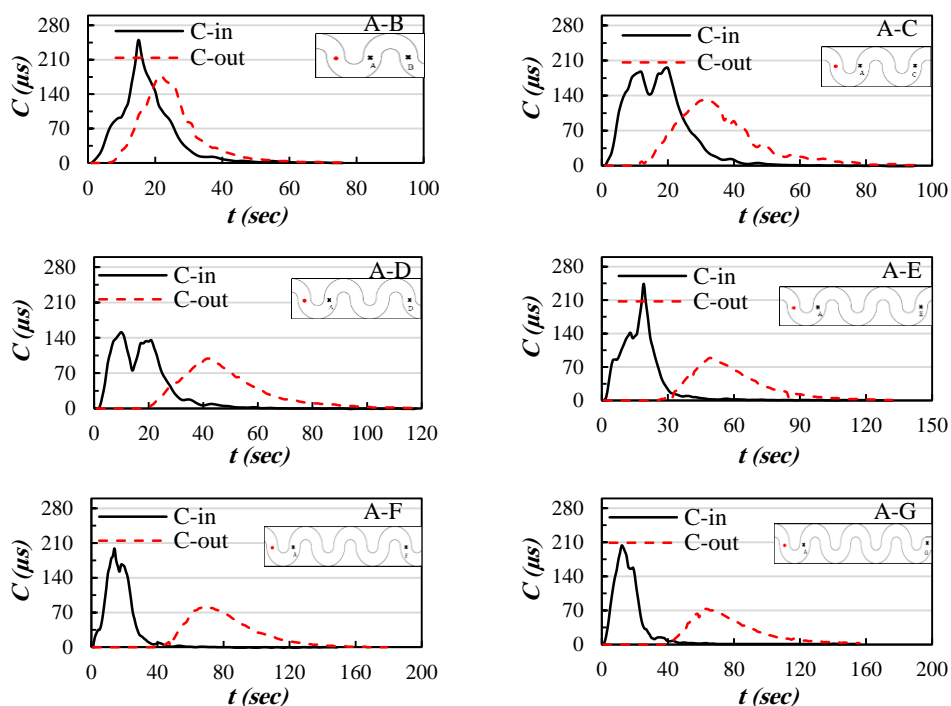


شکل ۴- نمودارهای تغییرات زمانی غلظت در بازه‌های مختلف برای دبی واحد عرض  $0.18 \text{ m}^3/\text{m.s}$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$ .

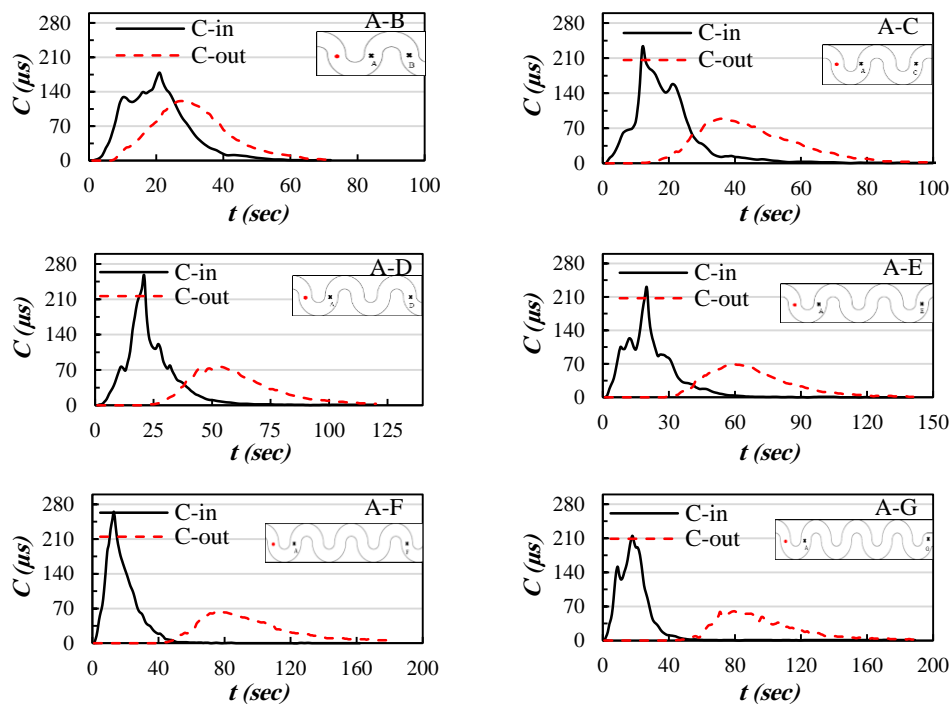
Figure 4. Temporal concentration profiles of  $E_c$  for different location for  $q=0.018 \text{ m}^3/\text{m.s}$  and the test set  $W_{S1-1}$ .



شکل ۵- نمودارهای تغییرات زمانی غلظت در بازه‌های مختلف برای دبی واحد عرض  $0.018 \text{ m}^3/\text{m.s}$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-0}$ .  
 Figure 5. Temporal concentration profiles of  $E_c$  for different location for  $q=0.018 \text{ m}^3/\text{m.s}$  and the test set  $W_{S1-0}$ .



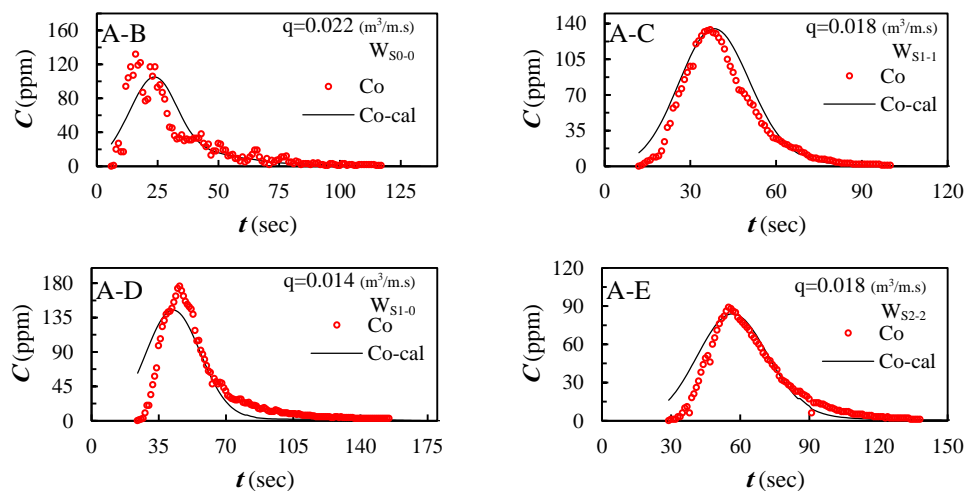
شکل ۶- نمودارهای تغییرات زمانی غلظت در بازه‌های مختلف برای دبی واحد عرض  $0.018 \text{ m}^3/\text{m.s}$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S2-2}$ .  
 Figure 6. Temporal concentration profiles of  $E_c$  for different location for  $q=0.018 \text{ m}^3/\text{m.s}$  and The test set  $W_{S2-2}$ .



شکل ۷- نمودارهای تغییرات زمانی غلظت در بازه‌های مختلف برای دبی واحد عرض  $0.018 \text{ m}^3/\text{m.s}$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S3-3}$ .  
**Figure 7. Temporal concentration profiles of Ec for different location for  $q=0.018 \text{ m}^3/\text{m.s}$  and The test set  $W_{S3-3}$ .**

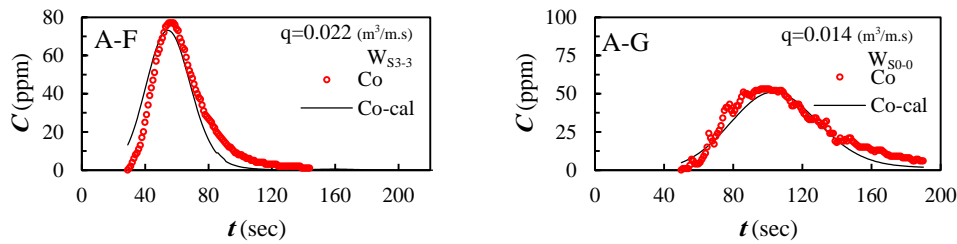
شده می‌باشد. به طوری که در پژوهش حاضر خطای میانگین مربعات مربوط به نمودارهای اندازه‌گیری شده و برآورد شده بین  $0.36$  تا  $2/73$  حاصل گردید. کم‌ترین خطای میانگین مربعات و بهترین همپوشانی مربوط به مجموعه آزمایش‌های  $W_{S3-3}$  می‌باشد.

در شکل ۸ نمونه‌ای از مقایسه نمودارهای تغییرات زمانی غلظت برآورد شده با کمک معادله‌های ۷ و ۸ با مقادیر آزمایشگاهی متناظر با آن‌ها نشان داده شده است. بررسی نمودارها نشان‌دهنده تطابق و همپوشانی خوب دو نمودار غلظت اندازه‌گیری شده و محاسبه



شکل ۸- مقایسه غلظت مشاهده شده و محاسبه شده برای مقاطع و دبی‌های مختلف.

**Figure 8. Comparison of observed concentration and calculated concentration for different discharge and sections.**



ادامه شکل ۸-

Continue Figure 8.

پارامتر  $Cr$  نیز تا حدودی با افزایش مقدار مواجه شد. بررسی تغییرات پارامتر  $T_{pr}$  بیانگر آن است که با افزایش دبی واحد عرض از کم‌ترین به بیش‌ترین مقدار، پارامتر مذکور در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  افزایش مقدار تا ۶۰ درصد و در دیگر مجموعه آزمایش‌ها، کاهش مقدار در محدوده ۱ تا ۹۰ درصد از خود نشان داده است. بررسی نتایج نشان داد که در شرایط مشابه، تغییرات پارامتر  $T_{dr}$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$ ،  $W_{S1-0}$  و  $W_{S3-3}$  روند نزولی و در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S0-0}$  و  $W_{S2-2}$  روند صعودی دارد. دامنه تغییرات پارامتر مذکور از ۶۳ درصد کاهش مقدار تا ۶۴ درصد افزایش مقدار به دست آمد. با افزایش دبی واحد عرض از  $0.014 \text{ m}^3/\text{m.s}$  به  $0.022 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، سرعت انتقال ردیاب در تمامی آزمایش‌ها با افزایش مقدار تا ۸۵ درصد و ضریب پراکندگی طولی در اغلب آزمایش‌ها دارای افزایش مقدار تا ۹۸ درصد شد. بیش‌ترین تغییرات پارامترهای مذکور مربوط به مجموعه آزمایش‌های  $W_{S0-0}$  می‌باشد. بررسی‌های به عمل آمده نشان داد که با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف، افزایش دبی واحد عرض و آشفستگی و تلاطم بیش‌تر جریان منجر به افزایش پارامتر  $D_L$  می‌شود.

بررسی تأثیر تغییرات طول بازه‌ها و تعداد قوس‌های پیچان‌رود بر پارامترهای اختلاط نشان داد که در اغلب آزمایش‌ها به دنبال افزایش طول مسیر

نتایج برآورد و محاسبه پارامترهای مختلف مانند  $Cr$ ،  $T_{pr}$ ،  $T_{dr}$  و  $D_L$  حاصل از آزمایش‌های ردیابی برای دبی‌ها، بازه‌ها و آرایش‌های متفاوت کارگذاری و عدم کارگذاری سرریزها در قالب جدول (۳) آورده شده است. بررسی نتایج بیانگر آن است که با افزایش دبی واحد عرض از  $0.014 \text{ m}^3/\text{m.s}$  به  $0.022 \text{ m}^3/\text{m.s}$ ، پارامتر  $Cr$  در مجموعه آزمایش‌های بدون نصب سرریزهای قوس رودخانه ( $W_{S0-0}$ )، در اغلب آزمایش‌ها با کاهش مقدار بین ۲۳ تا ۹۷ درصد، در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  غالباً با افزایش مقدار از ۱ تا ۲۰ درصد و در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-0}$  بین ۳ تا ۳۳ درصد کم شد. هم‌چنین در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S2-2}$  و  $W_{S3-3}$  به دنبال افزایش دبی واحد عرض، تغییرات پارامتر مذکور بین ۹۶ درصد کاهش مقدار تا ۵۰ درصد افزایش مقدار می‌باشد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد به‌طورکلی در غالب آزمایش‌ها با افزایش دبی واحد عرض و متوسط سرعت جریان، ردیاب تزریق شده در آبراهه به سرعت همراه با جریان به پایین دست منتقل شده و پارامتر  $Cr$  کاهش یافت. با این حال در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  و  $W_{S3-3}$  که کارگذاری سرریز در دو سمت پیچان‌رود به ترتیب با فواصل نسبی  $2/5$  و  $1/7$  انجام گرفته است، مشاهده شد که با افزایش موانع و زبری دیواره، افزایش جریان‌های چرخشی و کاهش سرعت انتقال ردیاب به دنبال افزایش دبی واحد عرض،

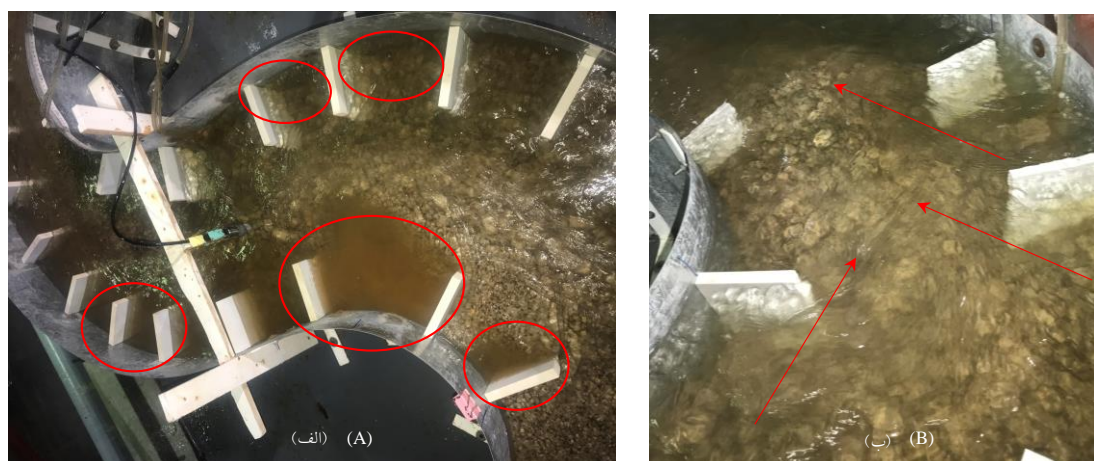
طی شده تا  $L_r=113/2$  تمامی پارامترها روند افزایشی داشته‌اند. به عنوان نمونه، برای دبی واحد عرض  $0.18 \text{ m}^3/\text{m.s}$  با افزایش  $L_r$  از  $31/7$  به  $113/2$ ، پارامترهای  $Cr$  و  $D_L$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S0-0}$  از  $0.386$  و  $0.089 \text{ m}^2/\text{s}$  به  $0.650$  و  $0.058 \text{ m}^2/\text{s}$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  از  $0.399$  و  $0.007$  به  $0.698$  و  $0.128 \text{ m}^2/\text{s}$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-0}$  از  $0.417$  و  $0.006 \text{ m}^2/\text{s}$  به  $0.714$  و  $0.180 \text{ m}^2/\text{s}$  در مجموعه آزمایش  $W_{S2-2}$  از  $0.296$  و  $0.008 \text{ m}^2/\text{s}$  به  $0.635$  و  $0.101 \text{ m}^2/\text{s}$  و در مجموعه آزمایش  $W_{S3-3}$  از  $0.324$  و  $0.021 \text{ m}^2/\text{s}$  به  $0.720$  و  $0.119 \text{ m}^2/\text{s}$  تغییر یافتند.

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های بدون سرریز و با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف نشان داد که پارامتر  $Cr$  با کارگذاری سرریز در دو طرف مسیر با فاصله نسبی  $2/5$  (مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$ )، از  $0/5$  به  $0/62$  افزایش یافت. با تغییر جانمایی سرریزها و کارگذاری در قوس داخلی با همان فاصله (مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-0}$ )، پارامتر مذکور از  $0/5$  به  $0/57$  افزایش یافت. در شرایط ذکر شده پارامتر  $Cr$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-0}$  با  $11$  درصد افزایش مقدار نسبت به مجموعه آزمایش‌های  $W_{S0-0}$  و  $7$  درصد کاهش مقدار نسبت به مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  مواجه شده است. همان‌طور که در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود، به دلیل وجود ناحیه سکون در بین سرریزها، مقداری از جریان حامل ردیاب در میان این سازه‌ها ذخیره شده و در طول آزمایش به تدریج آزاد می‌گردد. با تغییر موقعیت جاگذاری سرریزها از دو طرف پیچان‌رود به نصب در قوس داخلی، ذخیره‌سازی ردیاب تنها در یک طرف آبراهه انجام می‌گیرد که این امر منجر به کاهش پارامتر  $Cr$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-0}$  نسبت به مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  می‌شود. با

افزایش  $5$  برابری فاصله نسبی سرریزها و کارگذاری در دو طرف مسیر پیچان‌رود در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S2-2}$  پارامتر  $Cr$  به  $0/45$  تغییر و نسبت به مجموعه آزمایش‌های  $W_{S0-0}$ ،  $W_{S1-1}$  و  $W_{S1-0}$  به ترتیب با  $7$ ،  $27$  و  $21$  درصد کاهش مقدار مواجه شد. از آنجایی که با بیش‌تر شدن فاصله سرریزها تعداد موانع در مسیر جریان کاهش یافته، ردیاب با سرعت بیش‌تری حمل شده و نسبت به آرایش‌های قبلی مقدار کم‌تری از ردیاب در بین سازه‌ها به تله می‌افتد. با کاهش بیش‌تر فاصله بین سرریزها تا  $20$  سانتی‌متر و فاصله نسبی برابر با  $1/7$  در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S3-3}$  پارامتر  $Cr$  به‌طور متوسط برابر با  $0/57$  حاصل شد. پارامتر مذکور در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S3-3}$  نسبت به حالت بدون سرریز ( $W_{S0-0}$ )  $7$  درصد افزایش مقدار، نسبت به کارگذاری سرریز با فاصله نسبی  $2/5$  در دو طرف مسیر و تنها در قوس داخلی ( $W_{S1-1}$  و  $W_{S1-0}$ ) به ترتیب  $11$  و  $4$  درصد کاهش مقدار و نسبت به کارگذاری سرریز در دو طرف مسیر با فاصله نسبی  $5$  ( $W_{S2-2}$ )  $17$  درصد افزایش مقدار داشت. در آزمایش‌های انجام گرفته با هندسه مذکور به دلیل افزایش تعداد موانع در مسیر جریان حامل ردیاب مقدار پارامتر  $Cr$  نسبت به هندسه  $W_{S2-2}$  با افزایش مقدار مواجه شده است. هم‌چنین از آنجایی که سرریزهای قوس رودخانه موجب انتقال خط‌القعر جریان از سمت قوس به مرکز کانال و دماغه سازه می‌شوند (شکل ۹)، هر چه فاصله بین سازه‌ها کم‌تر باشد این عمل تشدید می‌یابد بنابراین در این مجموعه آزمایش‌ها، کاهش فاصله بین سرریزها نسبت به دو مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  و  $W_{S1-0}$  منجر به انتقال بیش‌تر جریان به سمت مرکز و ذخیره‌سازی کم‌تر ردیاب در بین سازه‌ها شده و تغییرات پارامتر  $Cr$  در هندسه مذکور نسبت به هندسه‌های  $W_{S1-1}$  و  $W_{S1-0}$  نزولی بود. به‌طورکلی

بررسی نتایج اثر کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه بر پارامتر  $T_{pr}$  نشان داد که در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  پارامتر مذکور تا ۶۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. پارامتر مذکور با تغییر موقعیت سرریزها و نصب در قوس داخلی در هندسه کارگذاری  $W_{S1-0}$  تا ۶۱ درصد، با افزایش فاصله نسبی سرریزها تا ۵ و کارگذاری در دو طرف مسیر در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S2-2}$  تا ۴۹ درصد و با کاهش فاصله نسبی سرریزها تا ۱/۷ در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S3-3}$  تا ۴۸ درصد نسبت به حالت بدون سرریز (مجموعه آزمایش‌های  $W_{S0-0}$ ) افزایش پیدا کرد.

مقایسه نتایج نشان داد که بیش‌ترین کارایی در افزایش اختلاف بیشنه غلظت ثبت شده در ورودی و خروجی بازه‌ها و بهبود پارامتر  $Cr$  به‌ترتیب با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$ ،  $W_{S1-0}$  و  $W_{S3-3}$  حاصل شده است و کارگذاری سازه در مجموعه آزمایش  $W_{S2-2}$  تأثیر قابل‌توجهی در بهبود پارامتر  $Cr$  نداشت. به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که در بهبود و افزایش پارامتر  $Cr$ ، نصب سرریز با فاصله ۲/۵ برابر طول سازه در دو طرف مسیر پیچان‌رود بهترین عملکرد و کارگذاری سرریزها با فاصله ۵ برابر طول سازه عملکرد نامطلوب نشان دادند.



شکل ۹- نمای از تغییرات الگوی جریان در اطراف سرریزهای قوس رودخانه الف) مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$ ، ب) مجموعه آزمایش‌های  $W_{S3-3}$ .

Figure 9. A view of the flow pattern around the bendway weirs a) test set  $W_{S1-1}$ , B) test set  $W_{S3-3}$ .

به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در پیچان‌رود آزمایشگاهی با بستر رسوبی و افزایش موانع و ناهمواری بستر در مسیر جریان، در بازه‌های آزمایشی با طول مشابه، منجر به افزایش پارامترهای سنجش زمانی انتقال ردیاب و در نتیجه در مسافتی محدود و کوتاه، فرصت بیش‌تری برای امکان‌فعالیت‌های شیمیایی جهت ترقیق و اختلاط آلاینده نسبت به

مقایسه پارامتر  $T_{dr}$  حاصل از آزمایش‌های مختلف بدون سازه و با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف بیانگر آن است که پارامتر مذکور با کارگذاری سرریز در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$ ،  $W_{S1-0}$  و  $W_{S3-3}$  در تمامی آزمایش‌ها و در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S2-2}$  در غالب آزمایش‌ها با افزایش مقدار تا ۸۴ درصد نسبت به حالت بدون سرریز مواجه شده است.

حالت بدون سرریز فراهم می‌شود. بیش‌ترین تأثیر در افزایش مقادیر زمان خروج ابر ردیاب مربوط به کارگذاری سرریز با نسبت ۱/۷ برابری فاصله سرریزها به طول سازه و نصب در دو طرف مسیر و با نسبت ۲/۵ برابری فاصله سرریزها به طول سازه و کارگذاری در دو طرف مسیر و تنها در قوس داخلی می‌باشد.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف در پیچان‌رود آزمایشگاهی با بستر رسوبی، منجر به کاهش مقادیر سرعت انتقال ردیاب ( $U$ ) شده است. بیش‌ترین تغییرات پارامتر مذکور در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  برابر با ۷۸ درصد بود. در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-0}$  برابر با ۵۸ درصد، در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S2-2}$  برابر با ۷۵ درصد و در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S3-3}$  برابر با ۵۹ درصد کاهش پیدا کرد. با توجه به وجود چاله‌های آبستگي در بستر رسوبی، با حرکت جریان مقداری از جریان حامل ردیاب توسط این چاله‌ها نگه داشته می‌شوند. با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در دو طرف مسیر و ایجاد موانع علاوه‌بر چاله‌های آبستگي مقداری از جریان حامل ردیاب در میان سازه‌ها نیز به تله افتاده و در ادامه به تدریج آزاد شده و همراه با جریان از بازه مورد آزمایش خارج می‌شود که این امر منجر به کاهش سرعت انتقال ردیاب در شرایط آزمایشی با نصب سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف نسبت به حالت بدون سازه شد.

بررسی نتایج بیانگر آن است که با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در دو طرف مسیر پیچان‌رودی با فاصله نسبی ۲/۵ ( $W_{S1-1}$ ) پارامتر  $D_L$  در غالب آزمایش‌ها به‌طور متوسط با کاهش مقدار تا ۸ درصد نسبت به حالت بدون سرریز ( $W_{S0-0}$ ) مواجه شد. کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه جریان‌های چرخشی و گردابه‌هایی ایجاد می‌کنند که چگونگی

پخش و انتقال این گردابه‌ها می‌تواند در تغییرات پارامتر  $D_L$  تأثیرگذار باشد. نصب سرریز با هندسه مذکور اگر چه موجب افزایش اختلاف غلظت ردیاب در ورودی و خروجی بازه شد، اما الگوی توزیع ردیاب و جریان‌های چرخشی در این هندسه منجر به کاهش سرعت انتقال ردیاب و ضریب پراکندگی طولی نسبت به حالت بدون سرریز شده است. با کارگذاری سرریزها در قوس داخلی پیچان‌رود با فاصله نسبی ۲/۵ ( $W_{S1-0}$ ) پارامتر مذکور در غالب آزمایش‌ها نسبت به حالت بدون سرریز ( $W_{S0-0}$ ) به‌طور متوسط تا ۶ درصد کاهش و نسبت به کارگذاری سرریزها در دو طرف مسیر ( $W_{S1-1}$ ) به‌طور متوسط ۲ درصد افزایش یافت. نتایج بیانگر آن است که در مجموعه آزمایش‌های یاد شده نصب سرریزها با آرایش مذکور به‌دلیل ایجاد گردابه‌های ناشی از سرریزها و تله‌اندازی جریان حامل ردیاب فقط در یک طرف آبراهه، کمی بهبود در انتقال ردیاب توسط جریان و گردابه‌های حاصله و پارامتر  $D_L$  نسبت به آرایش پیشین داشت. با بیش‌تر شدن فاصله نسبی سرریزها تا ۵ و کارگذاری در دو طرف مسیر پیچان‌رودی ضریب پراکندگی طولی در غالب آزمایش‌ها نسبت به آزمایش‌های بدون سرریز و دو مجموعه آزمایش با کارگذاری سرریز در هندسه‌های  $W_{S1-1}$  و  $W_{S1-0}$  به‌ترتیب با ۲۳، ۱۲ و ۱۹ درصد کاهش مقدار همراه شد. از آنجایی‌که کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش مذکور در این مجموعه آزمایش تأثیری در بهبود و افزایش پارامتر  $Cr$  نداشت، بنابراین در تغییرات پارامتر  $D_L$  نیز عملکرد مطلوبی نداشت. با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در فاصله‌ای نزدیک‌تر به یکدیگر (نسبت ۱/۷ برابری فاصله به طول سرریزها) پارامتر مذکور نسبت به مجموعه آزمایش‌های پیشین، بدون سرریز و با هندسه‌های مختلف سرریز در غالب آزمایش‌ها با افزایش مقدار

مواجهه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که کارگذاری سرریزها در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۱/۷، به دلیل هدایت جریان و گردابه‌ها به مرکز آبراهه و توزیع یکنواخت‌تر آشفتگی‌ها، همچنین کاهش ذخیره‌سازی جریان حامل ردیاب در بین سازه‌ها نسبت به هندسه‌های قبلی، منجر به بهبود و افزایش ضریب پراکندگی طولی شده است.

مواجهه شد. به‌طور متوسط پارامتر  $D_L$  در مجموعه آزمایش مذکور نسبت به حالت بدون سرریز با ۲ درصد، نسبت به کارگذاری سرریز با فواصل نسبی ۲/۵ در دو طرف مسیر و تنها در قوس داخلی به‌ترتیب با ۱۰ و ۹ درصد و نسبت به مجموعه آزمایش‌های  $W_{S2-2}$  با کارگذاری سرریز در دو طرف مسیر با فاصله نسبی ۵ با ۲۷ درصد افزایش مقدار

جدول ۳- مقادیر پارامترهای به‌دست آمده در بازه‌های مختلف برای دی‌های مختلف در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S0-0}$  تا  $W_{S3-3}$ .

**Table 3. The values of parameters obtained in different sections for different flow rates in the set of tests  $W_{S0-0}$  to  $W_{S3-3}$ .**

نام مقطع عرضی Section name	دی واحد عرض $q$ (m <sup>3</sup> /m.s)	نام مجموعه آزمایش Test set name	$Cr$	$T_{pr}$	$T_{dr}$	سرعت انتقال ردیاب $U$ (m/s)	ضریب پراکندگی طولی $D_L$ (m <sup>2</sup> /s)
A-B	0.014	$W_{S0-0}$	0.456	0.166	0.090	0.1317	0.0396
		$W_{S1-1}$	0.418	0.310	0.316	0.0718	0.0136
		$W_{S1-0}$	0.459	0.428	0.574	0.0658	0.0326
		$W_{S2-2}$	0.273	0.240	0.045	0.1129	0.0192
		$W_{S3-3}$	0.250	0.285	0.215	0.0988	0.0459
	0.018	$W_{S0-0}$	0.386	0.217	0.141	0.1580	0.0895
		$W_{S1-1}$	0.399	0.640	0.191	0.0527	0.0072
		$W_{S1-0}$	0.417	0.296	0.449	0.0658	0.0063
		$W_{S2-2}$	0.296	0.285	0.114	0.1129	0.0083
		$W_{S3-3}$	0.324	0.222	0.171	0.0878	0.0219
	0.022	$W_{S0-0}$	0.452	0.120	0.191	0.2633	0.6691
		$W_{S1-1}$	0.451	0.785	0.315	0.0564	0.0090
		$W_{S1-0}$	0.305	0.304	0.307	0.0988	0.0136
		$W_{S2-2}$	0.274	0.538	0.123	0.0658	0.0098
		$W_{S3-3}$	0.253	0.227	0.045	0.1580	0.1324
A-C	0.014	$W_{S0-0}$	0.033	0.619	0.273	0.1126	0.0075
		$W_{S1-1}$	0.573	0.692	0.429	0.1126	0.0463
		$W_{S1-0}$	0.554	0.705	0.537	0.1216	0.0423
		$W_{S2-2}$	0.400	0.454	0.184	0.2027	0.1146
		$W_{S3-3}$	0.569	0.564	0.380	0.1322	0.0383
	0.018	$W_{S0-0}$	0.248	0.354	0.141	0.2764	0.0889
		$W_{S1-1}$	0.634	0.567	0.391	0.1382	0.0513
		$W_{S1-0}$	0.526	0.741	0.680	0.1600	0.0819
		$W_{S2-2}$	0.328	0.354	0.380	0.1900	0.0856
		$W_{S3-3}$	0.616	0.666	0.372	0.1520	0.1013
0.022	$W_{S0-0}$	0.497	0.307	0.175	0.3378	0.5561	
	$W_{S1-1}$	0.684	0.636	0.428	0.1322	0.0778	
	$W_{S1-0}$	0.409	0.451	0.488	0.2027	0.0765	
	$W_{S2-2}$	0.290	0.607	0.388	0.2027	0.0461	
	$W_{S3-3}$	0.429	0.588	0.230	0.1382	0.0388	

ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

نام مقطع عرضی Section name	دبی واحد عرض $q$ (m <sup>3</sup> /m.s)	نام مجموعه آزمایش Test set name	$Cr$	$T_{pr}$	$T_{dr}$	سرعت انتقال ردیاب $U$ (m/s)	ضریب پراکنندگی طولی $D_L$ (m <sup>2</sup> /s)
A-D	0.014	W <sub>S0-0</sub>	0.648	0.576	0.216	0.1324	0.0332
		W <sub>S1-1</sub>	0.544	0.522	0.465	0.1536	0.1307
		W <sub>S1-0</sub>	0.455	0.543	0.620	0.1477	0.0657
		W <sub>S2-2</sub>	0.239	0.714	0.436	0.1200	0.0160
		W <sub>S3-3</sub>	0.695	0.587	0.530	0.1067	0.0337
	0.018	W <sub>S0-0</sub>	0.584	0.388	0.313	0.2400	0.7707
		W <sub>S1-1</sub>	0.679	0.613	0.452	0.1371	0.0589
		W <sub>S1-0</sub>	0.593	0.638	0.582	0.1600	0.1114
		W <sub>S2-2</sub>	0.344	0.761	0.438	0.1371	0.0298
		W <sub>S3-3</sub>	0.704	0.603	0.474	0.1371	0.1103
	0.022	W <sub>S0-0</sub>	0.653	0.413	0.178	0.2259	0.4157
		W <sub>S1-1</sub>	0.687	0.604	0.495	0.1536	0.1499
		W <sub>S1-0</sub>	0.522	0.555	0.548	0.1829	0.0422
		W <sub>S2-2</sub>	0.463	0.540	0.416	0.1829	0.1805
		W <sub>S3-3</sub>	0.352	0.547	0.472	0.1600	0.0463
A-E	0.014	W <sub>S0-0</sub>	0.562	0.679	0.185	0.1789	0.0822
		W <sub>S1-1</sub>	0.684	0.758	0.572	0.1464	0.1191
		W <sub>S1-0</sub>	0.635	0.684	0.708	0.1610	0.0992
		W <sub>S2-2</sub>	0.616	0.709	0.493	0.1533	0.0534
		W <sub>S3-3</sub>	0.592	0.818	0.576	0.1533	0.1038
	0.018	W <sub>S0-0</sub>	0.478	0.595	0.262	0.2300	0.0799
		W <sub>S1-1</sub>	0.560	0.764	0.673	0.1651	0.0586
		W <sub>S1-0</sub>	0.575	0.653	0.609	0.1894	0.0792
		W <sub>S2-2</sub>	0.635	0.612	0.476	0.1610	0.0594
		W <sub>S3-3</sub>	0.700	0.661	0.503	0.1498	0.0889
	0.022	W <sub>S0-0</sub>	0.547	0.619	0.285	0.2385	0.1311
		W <sub>S1-1</sub>	0.744	0.773	0.504	0.1610	0.0840
		W <sub>S1-0</sub>	0.613	0.595	0.663	0.2147	0.1837
		W <sub>S2-2</sub>	0.501	0.600	0.564	0.1894	0.0949
		W <sub>S3-3</sub>	0.609	0.565	0.483	0.2147	0.3109
A-F	0.014	W <sub>S0-0</sub>	0.689	0.705	0.304	0.1458	0.0922
		W <sub>S1-1</sub>	0.718	0.718	0.640	0.1273	0.1211
		W <sub>S1-0</sub>	0.789	0.760	0.776	0.1094	0.0670
		W <sub>S2-2</sub>	0.481	0.814	0.485	0.1273	0.0327
		W <sub>S3-3</sub>	0.575	0.723	0.722	0.1273	0.0854
	0.018	W <sub>S0-0</sub>	0.396	0.725	0.233	0.1522	0.0261
		W <sub>S1-1</sub>	0.650	0.689	0.627	0.1628	0.0947
		W <sub>S1-0</sub>	0.750	0.725	0.721	0.1458	0.1770
		W <sub>S2-2</sub>	0.587	0.450	0.588	0.1707	0.0817
		W <sub>S3-3</sub>	0.769	0.816	0.575	0.1228	0.1385
	0.022	W <sub>S0-0</sub>	0.713	0.660	0.301	0.2709	0.3083
		W <sub>S1-1</sub>	0.716	0.854	0.587	0.1788	0.1997
		W <sub>S1-0</sub>	0.746	0.727	0.753	0.1863	0.2238
		W <sub>S2-2</sub>	0.469	0.636	0.597	0.2292	0.0955
		W <sub>S3-3</sub>	0.739	0.717	0.606	0.2416	0.4696

ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

نام	دبی	نام	$Cr$	$T_{pr}$	$T_{dr}$	سرعت انتقال	ضریب
مقطع عرضی	واحد عرض	مجموعه آزمایش				ردیاب	پراکندگی طولی
Section name	$q$ (m <sup>3</sup> /m.s)	Test set name				$U$ (m/s)	$D_L$ (m <sup>2</sup> /s)
A-G	0.014	W <sub>S0-0</sub>	0.732	0.837	0.316	0.1225	0.0273
		W <sub>S1-1</sub>	0.794	0.759	0.665	0.1466	0.1749
		W <sub>S1-0</sub>	0.729	0.831	0.765	0.1375	0.0836
		W <sub>S2-2</sub>	0.683	0.753	0.497	0.1568	0.1156
		W <sub>S3-3</sub>	0.664	0.781	0.679	0.1104	0.0375
	0.018	W <sub>S0-0</sub>	0.650	0.797	0.420	0.1596	0.0584
		W <sub>S1-1</sub>	0.698	0.736	0.658	0.1568	0.1280
		W <sub>S1-0</sub>	0.714	0.803	0.725	0.1987	0.1808
		W <sub>S2-2</sub>	0.635	0.806	0.657	0.1788	0.1012
		W <sub>S3-3</sub>	0.720	0.772	0.716	0.1397	0.1198
	0.022	W <sub>S0-0</sub>	0.365	0.609	0.464	0.2079	0.0590
		W <sub>S1-1</sub>	0.698	0.797	0.675	0.1515	0.1407
		W <sub>S1-0</sub>	0.638	0.850	0.736	0.1788	0.0755
		W <sub>S2-2</sub>	0.730	0.734	0.609	0.1863	0.1223
		W <sub>S3-3</sub>	0.672	0.822	0.652	0.1625	0.1357

### نتیجه‌گیری

بازه اندازه‌گیری است، در غالب بازه‌های مسیر پیچان‌رودی با کاهش ۵ تا ۹۷ درصد همراه بود. در شرایط مذکور تغییرات پارامتر  $T_{pr}$  که بیانگر اختلاف زمان نسبی رسیدن به بیشینه غلظت در دو نقطه اندازه‌گیری است نزولی بوده و پارامتر  $T_{dr}$  که بیانگر اختلاف زمان نسبی خروج ابر ردیاب از دو نقطه اندازه‌گیری می‌باشد در غالب آزمایش‌ها با کاهش مقدار در محدوده ۸ تا ۶۴ درصد مواجه شده است. نتایج بیانگر آن است که با افزایش دبی واحد عرض پارامتر  $U$  (سرعت انتقال ردیاب) در تمامی آزمایش‌ها با افزایش مقدار و پارامتر  $D_L$  (ضریب پراکندگی طولی) در اغلب آزمایش‌ها با افزایش مقدار در محدوده ۱۰ تا ۹۸ درصد مواجه شده است. مقایسه نتایج بیانگر آن است که افزایش ۸۲ برابری مسافت نسبی ( $L_r$ )، منجر به بهبود شاخص‌های مرتبط با کاهش غلظت شوری به عنوان نماد آلاینده‌گی می‌شود به طوری که تمامی پارامترهای حاصله با افزایش مقدار مواجه شدند. بیش‌ترین تغییرات پارامتر  $Cr$  برابر با ۶۶ درصد افزایش مقدار و مربوط به

حفاظت از زیستگاه‌های آبیان در رودخانه‌ها و افزایش کیفیت جریان آب در آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. امروزه با توجه به افزایش ورود آلاینده‌ها به رودخانه‌ها، مباحث مربوط به اختلاط و پراکندگی ماده در رودخانه‌ها دارای اهمیت می‌باشد. پیش‌بینی با دقت مناسب اختلاط و ضرایب آن، و کمک به افزایش این ضرایب با اقداماتی مانند افزایش تلاطم و آشفتگی جریان یا افزایش جریان‌های ثانویه، در بهبود کیفیت آب آبراهه‌ها و حفاظت از این منابع بسیار مؤثر است. در پژوهش حاضر ورود آلاینده‌ها به پیچان‌رودها با بستر رسوبی، به کمک آزمایش‌های ردیابی برای شرایط با و بدون حضور سرریزهای قوس رودخانه با دبی‌های متفاوت در پیچان‌رود آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. مقایسه آزمایش‌ها با دبی‌های مختلف نشان داد که با افزایش دبی واحد عرض از کم‌ترین به بیش‌ترین مقدار (از ۰/۰۱۴ m<sup>3</sup>/m.s به ۰/۰۲۲) پارامتر  $Cr$  که معرف اختلاف نسبی غلظت ورودی و خروجی از

### داده‌ها و اطلاعات

پژوهش حاضر از روش آزمایشگاهی انجام گرفته و داده‌های این پژوهش به صورت نمونه‌برداری مستقیم از مدل آزمایشگاهی انجام گرفته است.

### تعارض منافع

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان می‌باشد.

### مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: جمع‌آوری داده‌ها، انجام مراحل آزمایشگاهی، انجام تحلیل و نگارش مقاله  
نویسنده دوم و سوم: همکاری در انجام مراحل آزمایشگاهی، انجام تحلیل‌ها، نگارش، بازمینی و راهنمایی مسیر تحقیق  
نویسنده چهارم و پنجم: مشاوره مسیر تحقیق

### اصول اخلاقی

اصول اخلاقی در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت شده است و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

### حمایت مالی

پژوهش حاضر با تجهیزات آزمایشگاهی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان انجام گرفته است.

مجموعه آزمایش  $W_{S3-3}$  می‌باشد. هم‌چنین پارامتر  $D_L$  با ۹۶ درصد افزایش مقدار در مجموعه آزمایش  $W_{S1-0}$  مواجه شده است.

تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها بدون سازه و با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه با آرایش‌های مختلف نشان داد که پارامتر  $Cr$  با کارگذاری سازه در غالب آزمایش‌ها با افزایش مقدار تا ۹۴ درصد در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$ ، پارامتر  $T_{pr}$  با افزایش مقدار تا ۶۶ درصد در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$ ، پارامتر  $T_{dr}$  با افزایش مقدار تا ۸۴ درصد در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-0}$ ، پارامتر  $U$  با کاهش مقدار تا ۷۸ درصد در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  و پارامتر  $D_L$  در غالب آزمایش‌ها با کاهش مقدار تا ۹۸ درصد در مجموعه آزمایش‌های  $W_{S1-1}$  مواجه شده است. به‌طور کلی تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که با کارگذاری سرریزهای قوس رودخانه در هندسه‌های  $W_{S1-1}$  و  $W_{S1-0}$  به‌دلیل وجود ناحیه سکون در بین سرریزها که منجر به افزایش پارامترهای  $Cr$ ،  $T_{pr}$  و  $T_{dr}$  شد و هندسه  $W_{S3-3}$  به‌دلیل هدایت جریان به مرکز آبراهه و توزیع مناسب گردابه‌ها که منجر به افزایش پارامترهای  $Cr$ ،  $T_{pr}$ ،  $T_{dr}$  و  $D_L$  شد، بیش‌ترین تأثیر در بهبود پارامترهای انتقال و اختلاط ردیاب حاصل گردید.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان پژوهش، از گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان به‌دلیل همکاری‌های لازم و هم‌چنین در اختیار قرار دادن آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی و تجهیزات آزمایشگاهی، کمال تشکر را دارند.

منابع

1. Sharma, H., & Ahmad, Z. (2014). Transverse mixing of pollutants in streams: A review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(5), 472-482. doi:10.1139/cjce-2013-0561.
2. Sharma, H., & Ahmad, Z. (2012). A new technique for enhancing transverse mixing of pollutions in streams. *International Conference on Environmental Research (ICER)*. Nov. 22-24. University of Terengganu, Kuala Terengganu, Malaysia.
3. Nikora, V., & Roy, A. (2012). Secondary flows in rivers: Theoretical framework, recent advances, and current challenges. *Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, 1-22.
4. Sharma, H., & Ahmad, Z. (2018). Enhancing transverse mixing in streams with submerged vanes. *Environmental Fluid Mechanics*, 18(3), 661-681. doi:10.1007/s10652-017-9565-5.
5. Baek, K. O., & Seo, I. W. (2010). Routing procedures for observed dispersion coefficients in two-dimensional river mixing. *Advances in Water Resources*, 33(12), 1551-1559. doi:10.1016/j.advwatres.2010.09.005.
6. Fischer, H. B. (1968). *Methods for predicting dispersion coefficients in natural streams: with applications to lower reaches of the green and Duwamish Rivers, Washington* (Vol. 582). US Government Printing Office.
7. Seo, I. W., Choi, H. J., Kim, Y. D., & Han, E. J. (2016). Analysis of two-dimensional mixing in natural streams based on transient tracer tests. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(8). doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001118.
8. Azhdan, Y., Emadi, A., Chabokpour, J., & Daneshfaraz, R. (2018). Experimental and numerical study of advection-dispersion of pollutant in a gravel bed rivers. *Water and Soil Science*, 28, 127-139. doi:10.22059/ijswr.2018.244186.667776. [In Persian]
9. Park, I., & Seo, I. W. (2018). Modeling non-Fickian pollutant mixing in open channel flows using two-dimensional particle dispersion model. *Advances in Water Resources*, 111, 105-120. doi:10.1016/j.advwatres.2017.10.035.
10. Fischer, H. B., List, J. A., Koh, R., Imberger, J., & Brooks. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic press. Language: English. Paperback ISBN: 9780123958167. PP: 102-147.
11. Lanzoni, S., Ferdousi, A., & Tambroni, N. (2018). River banks and channel axis curvature: Effects on the longitudinal dispersion in alluvial rivers. *Advances in Water Resources*, 113, 55-72. doi:10.1016/j.advwatres.2017.10.033.
12. Park, S. W., & Ahn, J. (2019). Experimental and numerical investigations of primary flow patterns and mixing in laboratory meandering channel. *Smart Water*, 4(4). doi:10.1186/s40713-019-0016-y.
13. Shin, J., Seo, I. W., & Baek, D. (2020). Longitudinal and transverse dispersion coefficients of 2D contaminant transport model for mixing analysis in open channels. *Journal of Hydrology*, 583, 124302. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124302.
14. Nojomi Siahmard, S., Mefth Halaghi, M., Esmaeili Varaki, M., Dehghani, A., & Zahiri, A. (2023). The effect of changing bed roughness on the pollution mixing process of meandering. *Journal of Water and Wastewater*, 34(5), 66-88. doi:10.22093/wwj.2023.412853.3368. [In Persian]
15. Chen, Y., Wang, Z., Zhu, D., & Liu, Z. (2016). Longitudinal dispersion coefficient in ice-covered rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 54(5), 558-566. doi:10.1080/00221686.2016.1175519.
16. West, P. O., Wallis, S. G., Sonnenwald, F. C., Hart, J. R., Stovin, V. R., & Guymer, I. (2020). Modelling transverse solute mixing across a vegetation generated shear layer. *Journal of Hydraulic Research*, 1-16. doi:10.1080/00221686.2020.1818307.